

(12) NACH DEM VERTRAG ÜBER DIE INTERNATIONALE ZUSAMMENARBEIT AUF DEM GEBIET DES
PATENTWESENS (PCT) VERÖFFENTLICHTE INTERNATIONALE ANMELDUNG

(19) Weltorganisation für geistiges Eigentum
Internationales Büro



(43) Internationales Veröffentlichungsdatum
6. Oktober 2005 (06.10.2005)

PCT

(10) Internationale Veröffentlichungsnummer
WO 2005/092259 A1

(51) Internationale Patentklassifikation⁷: **A61F 9/007**,
B23K 26/00, 26/06

(21) Internationales Aktenzeichen: PCT/EP2005/003066

(22) Internationales Anmeldedatum:
22. März 2005 (22.03.2005)

(25) Einreichungssprache: Deutsch

(26) Veröffentlichungssprache: Deutsch

(30) Angaben zur Priorität:
10 2004 014 181.9 23. März 2004 (23.03.2004) DE

(71) Anmelder (für alle Bestimmungsstaaten mit Ausnahme
von US): **CARL ZEISS MEDITEC AG** [DE/DE];
Göschwitzer Str. 51-52, 07745 Jena (DE).

(72) Erfinder; und

(75) Erfinder/Anmelder (nur für US): **BISCHOFF, Mark**
[DE/DE]; Am Bach 3, 99334 Elleben OT Riechheim
(DE). **MÜHLHOFF, Dirk** [DE/DE]; Am Mönchenberge
2, 07751 Kunitz (DE). **STOBRAWA, Gregor** [DE/DE];
Gillestr. 21, 07743 Jena (DE).

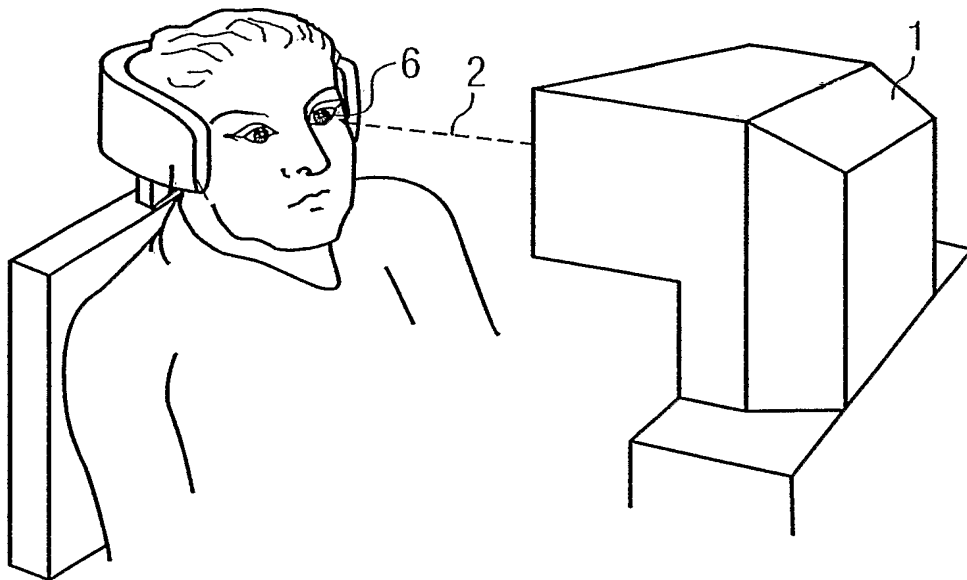
(74) Anwälte: **BREIT, Ulrich** usw.; Geyer, Fehners & Partner,
Perhamerstrasse 31, 80687 München (DE).

(81) Bestimmungsstaaten (soweit nicht anders angegeben, für
jede verfügbare nationale Schutzrechtsart): AE, AG, AL,
AM, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BR, BW, BY, BZ, CA, CH,
CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DZ, EC, EE, EG, ES,
FI, GB, GD, GE, GH, GM, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE,
KG, KP, KR, KZ, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LV, MA, MD,
MG, MK, MN, MW, MX, MZ, NA, NI, NO, NZ, OM, PG,
PH, PL, PT, RO, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, SY, TJ,

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

(54) Title: MATERIAL MACHINING DEVICE AND METHOD

(54) Bezeichnung: MATERIALBEARBEITUNGSVORRICHTUNG UND -VERFAHREN



(57) Abstract: The aim of the invention is to machine a material (13) by means of non-linear laser radiation (2). Said aim is achieved by modifying the laser radiation (2) emitted by a laser beam source (9) with the aid of a polarization modulator in such a way that laser radiation (8) focused into the material (14) is polarized in a linear fashion, the direction of polarization varying across the cross section of the beam.

[Fortsetzung auf der nächsten Seite]

WO 2005/092259 A1



TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, YU, ZA, ZM, ZW.

PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

(84) Bestimmungsstaaten (*soweit nicht anders angegeben, für jede verfügbare regionale Schutzrechtsart*): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), eurasisches (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), europäisches (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, MC, NL,

Veröffentlicht:

— mit internationalem Recherchenbericht

Zur Erklärung der Zweibuchstaben-Codes und der anderen Abkürzungen wird auf die Erklärungen ("Guidance Notes on Codes and Abbreviations") am Anfang jeder regulären Ausgabe der PCT-Gazette verwiesen.

(57) Zusammenfassung: Zur Bearbeitung eines Materials (13) mittels nicht-linear wirkender Laserstrahlung (2) wird die von einer Laserstrahlquelle (9) abgegebene Laserstrahlung (2) mittels eines Polarisationsmodulators (10) so verändert, daß in das Material (14) fokussierte Laserstrahlung (8) linear polarisiert ist, mit über den Strahlquerschnitt variierender Polarisationsrichtung.

Carl Zeiss Meditec AG
Anwaltsakte: PAT 9030/054-PCT

22. März 2005
K/22/vz

MATERIALBEARBEITUNGSVORRICHTUNG UND -VERFAHREN

Die Erfindung bezieht sich auf eine Bearbeitungsvorrichtung, die ein Material durch nicht-lineare
5 Absorption von Bearbeitungs-Laserstrahlung bearbeitet und die aufweist: eine die
Laserstrahlung abgebende Laserstrahlquelle und eine Optik, die die Laserstrahlung zur nicht-
linearen Absorption in oder auf das Material fokussiert. Die Erfindung bezieht sich weiter auf ein
Verfahren zur Materialbearbeitung, bei dem Laserstrahlung in oder auf das Material fokussiert
wird, wobei die Parameter der Laserstrahlung und der Fokussierung so gewählt werden, daß
10 am Material eine nicht-lineare Absorption der Laserstrahlung bewirkt wird.

Laserbasierte Materialbearbeitung ist heute in vielen Bereichen der industriellen Fertigung
unverzichtbar. Die durch den Lasereinsatz erreichbare Bearbeitungsqualität kann mit
alternativen Verfahren oft nicht erbracht werden. Hinzu kommt die Realisierung hoher
15 Prozeßgeschwindigkeiten bei der automatisierten Fertigung, die eine wirtschaftliche vorteilhafte
Anwendung laserbasierter Verfahren erlaubt. Zur Durchführung gibt es eine Vielzahl komplexer
Geräte und Anlagen, die als Workstations für eine Reihe spezifischer Bearbeitungsaufgaben
angepaßt sind. Die industriellen Workstations umfassen beispielsweise Systeme zum
Schneiden von Blechen ebenso wie Geräte zur Bearbeitung von Strukturen auf einem
20 Mikrochip. Auch für die Durchführung medizinischer Verfahren gibt es Lasersysteme, etwa zur
Korrektur der Sehstärke bei Myopie oder Hyperopie. Bei diesen Lasersystemen erfolgt die
Bearbeitung menschlichen Gewebes, während bei industriellen Applikationen meist feste
Werkstoffe wie Stahl oder Keramik bearbeitet werden. Anwendungen an flüssigen Werkstoffen,
etwa das lasergestützte Polymerisieren beim Rapid Prototyping sind ebenfalls bedeutsam.

25

Wird ein Objekt mit Laserstrahlung bestrahlt, so geschieht dies meist, um eine Messung
auszuführen oder um eine Bearbeitung des Materials des Objekts zu erzielen. In jedem Fall
erfolgt eine Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Material, beispielsweise eine
Reflektion, einen Streuprozess oder eine Absorption. Wichtige Anwendungen sind in diesem

Zusammenhang interferometrische Meßverfahren, konventionelle Lasermikroskopie oder die Belichtung von Photolacken bei der Halbleiterlithographie.

Es gibt allerdings auch Anwendungen, bei denen die übliche, d.h. lineare Wechselwirkung, zwischen Laserstrahlung und Material nicht möglich ist, beispielsweise weil das Material transparent ist. Für solche Anwendungsfälle kann zur Materialbearbeitung eine nicht-lineare Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Material ausgenutzt werden, das heißt insbesondere eine nicht-lineare Absorption der Laserstrahlung durch das Material des Objekts. Man spricht in diesem Zusammenhang von einer Absorption n-ter Ordnung, wenn eine Absorption von m Photonen durch ein Atom oder Molekül stattfindet, die zu einer n-fachen elektronischen Anregung führt. Es zeigt sich dabei, daß die Wahrscheinlichkeit für eine solche Absorption n-ter Ordnung von der Strahlungsintensität der Laserstrahlung abhängt.

Bei einem transparenten Material, wie es insbesondere bei laserchirurgischen ophthalmologischen Verfahren vorliegt, laufen bei nicht-linearer Wechselwirkung zeitlich hintereinander mehrere Prozesse ab, die durch die Laserstrahlung initiiert werden. Überschreitet die Leistungsdichtung der Strahlung einen Schwellwert, kommt es im transparenten Material zu einem optischen Durchbruch, der im Material eine Plasmablase erzeugt. Diese Plasmablase wächst nach Entstehen des optischen Durchbruches durch sich ausdehnende Gase. Wird der optische Durchbruch nicht aufrechterhalten, beispielsweise weil gepulste Laserstrahlung verwendet wurde, so wird das in der Plasmablase erzeugte Gas vom umliegenden Material wieder aufgenommen und die Blase verschwindet. Wird ein Plasma an einer Materialgrenzfläche erzeugt (die durchaus auch innerhalb einer Materialstruktur liegen kann), so erfolgt ein Materialabtrag von der Grenzfläche. Man spricht dann von Photoablation, wogegen bei einer Plasmablase, die zuvor verbundene Materialschichten trennt, üblicherweise von Photodisruption die Rede ist. Der Einfachheit halber werden all solche Prozesse hier unter dem Begriff „optischer Durchbruch“ zusammengefaßt, d.h. dieser Begriff schließt hier nicht nur den eigentlichen optischen Durchbruch selbst, sondern auch die daraus resultierenden Wirkungen im Material ein, die aufgrund der nicht-linearen Wechselwirkung ausgelöst wurden.

Für eine hohe Bearbeitungsgenauigkeit ist eine hohe Lokalisierung der Wirkung der Laserstrahlung erforderlich. Kollateralschäden in benachbarten Materialbereichen sollen möglichst vermieden werden.

Betrachtet man die Wahrscheinlichkeit für eine nicht-lineare Absorption, d.h. für die Absorption mehrerer Photonen, zeigt sich, daß die Wahrscheinlichkeit einer solchen Wechselwirkung bei einem Laserfokus, der durch ein beugungsbegrenztes optisches System erzeugt wurde, proportional zur n-ten Potenz des Quotienten aus Laserleistung mal Quadrat der numerischen

Apertur und Quadrat der verwendeten Wellenlänge ist. Für eine möglichst schnelle Materialbearbeitung mittels nicht-linearer Absorption möchte man natürlich die Wechselwirkungswahrscheinlichkeit optimieren. Eine Vergrößerung dieser Wahrscheinlichkeit für eine Mehrphotonenabsorption kann, wie sie sich aus dem geschilderten Zusammenhang
5 unmittelbar ableitet, durch Vergrößerung der Laserleistung, Vergrößerung der numerischen Apertur oder Minderung der verwendeten Wellenlänge der Laserstrahlung erzielt werden. Es ist im Stand der Technik für nicht-linear wirkende Laser-Materialbearbeitungskonzepte deshalb bislang unumgänglich gewesen, optische Systeme mit hoher numerischer Apertur bei der Fokussierung einzusetzen.

10

Die US 5.894.916 sowie US 6.110.166 beschreiben Verfahren zur Fehlsichtigkeitskorrektur mittels geeigneter Erzeugung optischer Durchbrüche in der menschlichen Hornhaut, so daß im Endeffekt die Brechungseigenschaften der Hornhaut gezielt beeinflußt werden. Durch Aneinanderreihen einer Vielzahl optischer Durchbrüche wird innerhalb der Hornhaut des Auges
15 ein linsenförmiges Teilvolumen isoliert, das dann mittels eines seitlichen öffnenden Schnittes aus der Hornhaut entnommen wird. Die Gestalt des Teilvolumens ist so gewählt, daß nach Entnahme des Teilvolumens die Brechungseigenschaften der Hornhaut so geändert sind, daß eine erwünschte Vielsichtigkeitskorrektur erreicht ist.

20

Der Erfindung liegt die Aufgabe zugrunde, eine Vorrichtung zur Materialbearbeitung mittels Laserstrahlung der eingangs genannten Art bzw. ein entsprechendes Bearbeitungsverfahren so weiterzubilden, daß das Erzeugen nicht-linearer Wechselwirkungen verbessert ist.

25

Diese Aufgabe wird erfindungsgemäß mit einer Bearbeitungsvorrichtung der eingangs genannten Art gelöst, die einen Polarisations-Modulator aufweist, welcher bewirkt, daß die fokussierte Laserstrahlung linear-polarisiert ist, mit über den Strahlquerschnitt variierender Polarisationsrichtung. Analog wird die Aufgabe gelöst mit einem Verfahren der eingangs genannten Art, bei dem die Laserstrahlung vor der Fokussierung linear polarisiert wird, mit über dem Strahlquerschnitt variierender Polarisationsrichtung.

30

Erfindungsgemäß wird also ein inhomogen polarisiertes Strahlungsfeld verwendet. Die Laserstrahlung ist zwar in jedem Punkt des Feldes linear polarisiert, kann aber – entgegen sonst üblichen Verteilungen – in jedem Punkt eine andere Polarisationsrichtung haben. Das erfindungsgemäß inhomogen polarisierte Strahlungsfeld führt überraschenderweise zu einer
35 Verringerung der Fokusgröße, wodurch die Laserstrahlungsleistungsdichte im Fokus steigt und damit auch die Wahrscheinlichkeit Mehr-Photonen-Prozesse auszulösen. Die Fokusverringerng war bislang lediglich theoretisch vermutet worden (Quabis et al., Opt. Com., 179, 2000) beziehungsweise für die optische Datenspeicherung experimentell erörtert worden

(Dorn et al., J. Mod. Opt. 50, 12, S. 1917 – 1926, 2003). Überraschenderweise kann das im Stand der Technik durchgängig für die lineare Wechselwirkung von Dauerstrich-Strahlung (cw-Strahlung) diskutierte Konzept auch für nicht-lineare Wechselwirkungen und insbesondere bei der Verwendung gepulster Laserstrahlung vorteilhaft eingesetzt werden. Beispielsweise kann bei der geschilderten Materialbearbeitung mittels optischer Durchbrüche nun die in das Material übertragene Energie minimiert werden, wodurch Kollateralschäden gering bleiben. Reiht man mehrere optische Durchbrüche mit dem erfindungsgemäßen Konzept aneinander, um flächenhafte Materialtrennungen durchzuführen, wird aufgrund des erfindungsgemäß erhaltenen verringerten Fokus eine bessere Schnittqualität erreicht.

Die Aufgabe wird weiter mit einer gattungsgemäßen Bearbeitungsvorrichtung gelöst, die aufweist einen Intensitäts-Modulator, der eine Intensitätsverteilung der Laserstrahlung modifiziert, wobei er die Strahlungsintensität nahe der optischen Achse schwächt. Analog wird die Aufgabe mit einem gattungsgemäßen Verfahren gelöst, bei dem die Intensitätsverteilung der Laserstrahlung vor der Fokussierung modifiziert wird, wobei die Strahlungsintensität nahe der optischen Achse geschwächt wird.

Polarisations-Modulator und Intensitäts-Modulator können also alternativ zur erfindungsgemäßen Aufgabenlösung eingesetzt werden. Der Intensitäts-Modulator bewirkt eine geeignete Veränderung des Strahlprofils. Die Erfinder erkannten, daß überraschenderweise eine Strahlprofilveränderung, bei der die Strahlungsintensität nahe der optischen Achse gemindert ist, ebenfalls zu einer verringerten Fokusgröße, d.h. zu einer besseren Fokussierung führt. Da übliche Laserstrahlquellen in der Regel einen Laserstrahl mit gauß-förmigem Profil abgeben, bewirkt der Intensitäts-Modulator für solche Bearbeitungsvorrichtungen, daß über das Strahlprofil gesehen Bereiche, die fern der optischen Achse liegen, proportional einen höheren Intensitätsanteil tragen, als im gauß-förmigen Profil.

In einer einfachen Ausgestaltung des Intensitäts-Modulators blendet dieser Strahlungsanteile nahe der optischen Achse aus oder schwächt diese. Realisierungsmöglichkeiten dafür liegen beispielsweise in Form einer im Zentrum des Strahlquerschnittes liegenden Punktblende bzw. punktförmigen Absorbereinheit, oder ein im Zentrum schlechter oder gar nicht reflektierender Reflektor, der den Strahlengang umlenkt. Damit verbundene Leistungsverluste über den gesamten Querschnitt der Laserstrahlung kann man durch entsprechende Erhöhung der Strahlungsleistung vor dem Intensitäts-Modulator ausgleichen.

Möchte man die Strahlungsleistung der Laserstrahlung möglichst unverändert lassen, bietet sich ein Intensitäts-Modulator an, der im Strahlquerschnitt eine Energieumverteilung vornimmt, bei welcher Energie von Bereichen nahe der optischen Achse weg in Außenbereiche des

Strahlquerschnittes verteilt wird. Ein Beispiel für die optischen Prinzipien, die ein derart wirkender Intensitäts-Modulator erfüllen muß, findet sich beispielsweise in der US 4.826.299, deren Offenbarungsgehalt, insbesondere hinsichtlich der optischen Parameter der dortigen Figur 16, hier explizit einbezogen wird.

5

Die Verwendung nicht-gauß-förmiger und insbesondere im Zentrum des Laserstrahls mit geringer Intensität versehener Laserstrahlung ist ein durchaus überraschendes Resultat, bedenkt man, daß die optische Qualität von zur Fokussierung verwendeten Linsen regelmäßig nahe der optischen Achse sehr viel besser ist, als in achsenfernen Bereichen. Es ist im Stand der Technik eine eingeführte Tatsache, daß zur Erhöhung der Fokusgüte die Strahlung
10 möglichst nahe der optischen Achse geführt werden soll, da in achsenfernen Bereichen geführte Strahlung regelmäßig einen Astigmatismus der Abbildung zur Folge hat.

Die erwähnte Intensitäts-Modulation kann alternativ oder ergänzend zur genannten
15 Polarisations-Modulation eingesetzt werden. Wenn nachfolgend, also allgemein von Modulation bzw. einem Modulator die Rede ist, kann sowohl Intensitäts- als auch Polarisations-Modulation darunter verstanden werden. Auch ist es möglich, eine aufeinander abgestimmte Wirkung auf Polarisation und Strahlungsintensität über den Strahlungsquerschnitt zu verbinden.

20 Ein weiterer überraschender Vorteil der Erfindung stellt sich beim erfindungsgemäßen Vorgehen in Kombination mit einer mehrdimensionalen Verstellung der Fokuslage ein, da die erfindungsgemäß erzielte hervorragende Fokusqualität im Stand der Technik ansonsten sehr große numerische Aperturen erforderlich machte, die einem großen Ablenkbereich für den Fokus hinderlich waren, nunmehr aber geringer sein können.

25

Die Erfinder erkannten, daß mit dem erfindungsgemäßen Ansatz bei derzeit bereits realisierten optischen Systemen zur Materialbearbeitung im Rahmen der refraktiven Augenchirurgie mittels Femto-Sekundenlaserstrahlung eine Verkleinerung des Fokusedurchmessers um bis zu 30% erzielt wird. Dadurch ist die Strahlenbelastung um bis zu 50% bei der Erzeugung eines
30 einzelnen optischen Durchbruches vermindert, bzw. bei Konstanthaltung der mit der Bearbeitung verbundenen Strahlenbelastung kann eine Verdopplung der Repetitionsrate der gepulsten Laserstrahlung und damit eine Halbierung der Gesamtbearbeitungszeit erreicht werden.

35 Erfindungsgemäß wird also eine Erhöhung der Energie- bzw. Leistungsdichte im Laserfokus zur Lasermaterialbearbeitung realisiert, indem

- eine Laserstrahlquelle,
- das als Modulator bezeichnete optisches Modul,

- vorzugsweise eine Ablenkeinheit, die durch Beeinflussung der Richtung und/oder Divergenz des Laserstrahls die räumliche Lage des Fokus der Laserstrahlung bezüglich des Materials steuert und
- ein Objektiv, welches so gestaltet ist, daß es für eine Fokussierung der Laserstrahlung in das Innere des Materials angepaßt ist, um im Material eine effiziente nicht-lineare Absorption der Laserstrahlung zu erzielen,

5 vorgesehen sind. Die mit dem Material nicht-linear wechselwirkende Laserstrahlung ist vorzugsweise gepulst und hat eine hohe Spitzenleistung wie dies beispielsweise bei Femtosekunden-Laserstrahlung der Fall ist. Der Modulator nutzt als Polarisations-Modulator in einer Ausführungsform ein oder mehrere Bauelemente zur Umwandlung homogen linear polarisierter Laserstrahlung, wie sie von Laserstrahlungsquellen üblicherweise emittiert wird, in inhomogen linear polarisiertes Laserlicht.

15 Zur Erzeugung einer Schnittfläche wird zweckmäßigerweise, wie bereits erwähnt, eine mehrdimensionale Verstellung des Fokus im oder am Material vorgenommen. Es ist deshalb eine Weiterbildung bevorzugt, die eine Ablenkeinheit aufweist, welche durch steuerbare Ablenkung der Laserstrahlung eine räumliche Lage des Fokus im oder am Material verändert.

20 Wesentlich für die erfindungsgemäße Erzielung der überragenden Fokusqualität ist die über den Strahlquerschnitt variierende Polarisationsrichtung der linear polarisierten Laserstrahlung bzw. die nahe der optischen Achse verringerte Strahlungsintensität. Für einen besonders einfach zur realisierenden Aufbau wird man den Modulator deshalb der Laserstrahlquelle nachordnen und ihn im Falle der Weiterbildung mit Ablenkeinheit zwischen Laserstrahlquelle und Ablenkeinheit anordnen. Vorteilhafterweise liegt der Modulator in einer beliebigen Pupillenebene des Strahlengangs zwischen Laserstrahlquelle und zu bearbeitendem Material.

25 Die Position des Intensitäts-Modulators ist nicht festgelegt und kann mittels einer Propagationsrechnung an eine Applikation angepaßt werden. In einem leicht zu überschauenden Spezialfall sind Modulationsebene und Fokusebene konjugiert; dann entspricht das Strahlprofil im Fokus des fouriertransformierten Strahlprofils direkt hinter dem

30 Modulator.

Alternativ zur nachträglichen Modulation homogen linear polarisierter bzw. gauß-förmiger Laserstrahlung mittels des Modulators kann der Polarisations-Modulator bzw. Intensitäts-Modulator auch direkt in der Laserstrahlquelle angeordnet werden, so daß diese bereits

35 Laserstrahlung mit über den Strahlquerschnitt variierender Polarisationsrichtung bzw. nicht-gauß-förmiger Intensitätsverteilung abgibt.

Es hat sich herausgestellt, daß je nach Geometrie des Strahlengangs mit dem die Laserstrahlung in oder auf das Material fokussiert wird und je nach Material verschiedenartig inhomogen linear polarisierte bzw. im Profil intensitätsverteilte Laserstrahlung bevorzugt sein kann. Im Sinne einer universellen Einsetzbarkeit der Bearbeitungsvorrichtung bzw.

5 Anwendbarkeit des Bearbeitungsverfahrens ist es zweckmäßig, wenn der Modulator hinsichtlich der Variation der Polarisationsrichtung bzw. der Veränderung der Intensitätsverteilung einstellbar oder insbesondere steuerbar ist. Die Einstellung kann dabei zweckmäßigerweise während des Betriebs der Vorrichtung erfolgen, beispielsweise durch Eingriff einer entsprechenden Steuereinrichtung.

10

Mit einem steuerbaren Modulator kann vorteilhafterweise eine Qualitätsregelung der Bearbeitung dahingehend erfolgen, daß ein bei der Materialbearbeitung ermittelter Meßwert, beispielsweise ein Güteparameter, geeignet geregelt wird durch Verwendung der Variation der Polarisationsrichtungen bzw. der Veränderung der Intensitätsverteilung als Stellgröße.

15

Das erfindungsgemäße Konzept ist überraschend vorteilhaft bei der Verwendung gepulster Laserstrahlung mit sehr kurzer Pulslänge, wodurch die in das Material eingebrachte Energie effektiver zur Materialbearbeitung eingesetzt wird. Es ist deshalb bevorzugt, daß die Laserstrahlquelle gepulste Laserstrahlung mit einer Pulslänge unter 10.000 fs, insbesondere

20 unter 500 fs abgibt. Ein besonders optimaler Wert hat sich im Bereich der Augenchirurgie bei etwa 350 fs ergeben. Bei noch kürzeren Pulsen vergrößert die zunehmende spektrale Breite der Pulse den technischen Aufwand.

25

Die erfindungsgemäß verwendete inhomogen linear polarisierte Laserstrahlung ermöglicht weiter eine schnelle Bearbeitung, beispielsweise im Falle von gepulster Laserstrahlung eine Pulswiederholfrequenz von über 100 kHz, insbesondere von über 450 kHz.

30

Für die nicht-lineare Wechselwirkung der Laserstrahlung mit dem Material kann zum einen eine Fokussierung in das Material hinein, d.h. unter dessen Oberfläche erfolgen. Es ist aber auch möglich, die Laserstrahlung in Nähe der Oberfläche des zu bearbeitenden Materials zu fokussieren. Eine besonders gute photoablative Wirkung erreicht man dann dabei, wenn der Abstand des Laserfokus zur Oberfläche des zu bearbeitenden Materials etwa im Bereich der Rayleigh-Länge der Laserstrahlung liegt.

35

Besonders zweckmäßig ist die erfindungsgemäß zu verwendende Laserstrahlung, wenn im Material durch flächenhaftes Aneinanderreihen von insbesondere optischen Durchbrüchen Schnittflächen ausgebildet werden, die im Material liegen und eine zur Oberfläche des Materials laufende Schnittlinie haben können.

Die Erfindung wird nachfolgend unter Bezugnahme auf die Zeichnungen beispielshalber noch näher erläutert. In den Zeichnungen zeigt:

- 5 Figur 1 eine perspektivische Darstellung eines Patienten während einer laserchirurgischen Behandlung mit einem laserchirurgischen Instrument,
 Figur 2 eine Schemadarstellung der Fokussierung eines Strahlenbündels auf das Auge des Patienten beim Instrument der Figur 1,
 Figur 3 eine schematische Darstellung zur Erläuterung einer während der laserchirurgischen Behandlung ausgeübten Schnittführung,
10 Figur 4 eine Schemadarstellung einer ersten Ausführungsform einer Laserbearbeitungsvorrichtung zur Erzeugung von Wellenleiterstrukturen,
 Figur 5 ein Beispiel für eine inhomogene lineare Polarisierung eines Laserstrahls der ersten Ausführungsform mit sektoraler Polarisationsvariation,
15 Figur 6 ein weiteres Beispiel für eine inhomogene lineare Polarisierung eines Laserstrahls der ersten Ausführungsform mit radialer Polarisationsvariation,
 Figur 7 ein weiteres Beispiels für eine inhomogene lineare Polarisierung eines Laserstrahls der ersten Ausführungsform mit unstetiger radialer Polarisationsvariation,
 Figur 8 eine Draufsicht auf einen Polarisationsmodulator der ersten Ausführungsform zur Erzeugung von Bearbeitungs-Laserstrahlung mit inhomogen linearer Polarisierung,
20 Figur 9 die Polarisationsrichtungen der Laserstrahlung bei Anwendung des Polarisationsmodulators der Figur 8,
 Figur 10 eine Schemadarstellung ähnlich der Figur 4 einer zweiten Ausführungsform einer Laserbearbeitungsvorrichtung,
25 Figuren 11 und 12 verschiedene Varianten eines Bauteils, das bei der Laserbearbeitungsvorrichtung der Figur 10 verwendet werden kann,
 Figur 13 bei der Laserbearbeitungsvorrichtung der Figur 10 mögliche Strahlprofile,
 Figur 14 eine Schemazeichnung zur Veranschaulichung einer weiteren Variante des Bauelementes der Figuren 11 und 12,
30 Figur 15 eine Schnittdarstellung des Bauelementes der Figur 14 sowie
 Figur 16 ein Strahlprofi, das mit dem Bauteil der Figur 15 erhältlich ist.

In Figur 1 ist ein laserchirurgisches Instrument 1 dargestellt, das einen Behandlungsstrahl 2 abgibt, welcher auf das Auge 6 eines Patienten gerichtet ist. Das laserchirurgische Instrument 1
35 erzeugt dabei einen gepulsten Behandlungsstrahl 2, so daß das in US 6.110.166 beschriebene Verfahren ausgeführt werden kann. Die Pulsdauer liegt dabei im Nano- oder Femtosekundenbereich.

Mittels des laserchirurgischen Instrumentes 1 wird eine Fehlsichtigkeit des Auges 6 des Patienten behoben, indem aus der Hornhaut Material derart entfernt wird, daß sich die Brechungseigenschaft der Hornhaut um ein gewünschtes Maß ändert. Das Material wird dabei dem Stroma der Hornhaut entnommen, das unterhalb von Epithel und Bowmanscher Membran und oberhalb der Decemetschen Membran und des Endothels liegt.

Das laserchirurgische Instrument 1 bearbeitet ein für Laserstrahlung an und für sich transparentes Material. Die gepulste Laserstrahlung des Behandlungsstrahls 2 wird deshalb so eingestrahlt, daß eine nicht-lineare Absorption zur Erzeugung des optischen Durchbruchs stattfindet.

Die Materialentfernung wird durch Fokussierung des hochenergetischen gepulsten Behandlungsstrahls 2 des laserchirurgischen Instrumentes 1 in das Stroma erreicht, wodurch optische Durchbrüche erzeugt werden. Jeder einzelne optische Durchbruch initiiert dabei eine Plasmablase, so daß Gewebe getrennt wird. Durch geeignete Ablenkung des Behandlungsstrahls 2 werden während der Behandlung Plasmablasen aneinandergereiht, die dann ein Teilvolumen des Stromas, nämlich das zu entfernende Material, umschreiben. Das laserchirurgische Instrument 1 wirkt durch den Behandlungsstrahl 2 wie ein chirurgisches Messer, das, ohne die Oberfläche der Hornhaut zu verletzen, direkt Material im Inneren der transparenten Augenhornhaut schneidet. Führt man den Schnitt durch weitere Erzeugung von optischen Durchbrüchen bis an die Oberfläche der Hornhaut, kann das durch die Schnitfführung isolierte Material des Stromas seitlich aus der Hornhaut herausgezogen und entfernt werden.

Das laserchirurgische Instrument 2 weist, wie in Figur 2 dargestellt ist, eine Laserquelle 9 auf, deren Behandlungsstrahl 2 mittels eines (verstellbaren) Objektives 3 als fokussierte Laserstrahlung 8 in die Hornhaut 4 des Auges 6 fokussiert wird. Im Fokus entsteht dann die bereits erwähnte Plasmablase 11.

Figur 3 zeigt schematisch die Erzeugung einer Schnitffläche in der Hornhaut 4 zur Isolierung eines Teilvolumens 5. Durch geeignete dreidimensionale Verstellung des fokussierten Laserstrahls 8 werden viele Plasmablasen 11 aneinandergereiht, um eine Schnitffläche (in Figur 3 gestrichelt gezeichnet) auszubilden. Ist das Teilvolumen 5 innerhalb der Hornhaut 8 isoliert, wird der Schnitt bis an den Rand geführt, so daß das Material des Teilvolumens 5 in Richtung des Pfeils 7 herausgezogen werden kann.

35

In Figur 4 ist vereinfacht, für eine erste Ausführungsform, der Aufbau eines Laserbearbeitungsinstrumentes dargestellt, das im wesentlichen dem laserchirurgischen Instrument 1 gleicht, jedoch hier zur Ausbildung einer Wellenleiterstruktur 14 in einem

transparenten Material 13 dient. Der Laserquelle 9 ist ein Polarisationsmodulator 10 nachgeordnet (der, wenn auch nicht erwähnt, im Strahlengang des laserchirurgischen Instrumentes 1 ebenfalls vorgesehen ist), welcher die von der Laserquelle 9 abgegebene linear polarisierte Strahlung 2 so verändert, daß sie inhomogene lineare Polarisationszustände aufweist.

Die inhomogenen linearen Polarisationszustände sind dadurch gekennzeichnet, daß der Polarisationsvektor \vec{P} des Feldes über den Querschnitt des kollimierten Laserstrahls keine einheitliche Richtung hat.

10

Zur physikalischen Charakterisierung solcher Polarisationszustände sei zunächst darauf verwiesen, daß für einen kollimierten Laserstrahl die Feldstärke in üblicher Form als ebene Welle angenähert werden kann. Die Lage des Feldstärkevektors ist für linear polarisiertes Licht dann in einem beliebigen x, y-Koordinatensystem, in dem sich die Welle in z-Richtung ausbreitet, in folgender Form darstellbar:

15

$$\vec{E} = \{E_{0x}, E_{0y}\} \exp i(\omega t - kz)$$

Zur Vereinfachung kann man nun den normierten Polarisationsvektor \vec{P} des Feldes einführen, wobei die Amplitude der Feldstärke vollständig durch die Amplitudenfunktion $\sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}$ bestimmt wird. Diese fällt für einen Gauß-Strahl zwar sehr schnell ab, doch gilt die folgende Gleichung für den Polarisationsvektor unabhängig von der speziellen Amplitudenverteilung:

20

$$\vec{P} \equiv \frac{E_{0x} \vec{e}_x + E_{0y} \vec{e}_y}{\sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2}}.$$

25

Damit ergibt sich für die Feldstärke:

$$\vec{E} = \sqrt{E_{0x}^2 + E_{0y}^2} \cdot \vec{P} \cdot \exp i(\omega t - kz).$$

30

Der Polarisationsvektor ist eine Funktion von x und y. Gilt

$$\vec{P} = \vec{P}(x, y) = \text{const.}$$

so ist dies ein homogen linear polarisiertes Feld, wie es von den meisten Lasern, beispielsweise einem Helium-Neon-Laser emittiert wird. Für den Fall

$$\vec{P} = \vec{P}(x, y) \neq \text{const.}$$

5

ist das betreffende Strahlungsfeld inhomogen linear polarisiert.

Nachdem der Laserstrahlung 2 somit eine inhomogen lineare Polarisation aufgeprägt wurde, passiert sie eine Ablenkeinheit 12, die hier symbolisch in Form von zwei eigenständig um orthogonale Achsen verkippbare Umlenkspiegel dargestellt ist. Zusammen mit dem verstellbaren Objektiv 3 kann damit der fokussierte Laserstrahl 8 dreidimensional im Volumen des transparenten Materials 13 verstellt werden, wodurch dreidimensionale Strukturen im Material ausgebildet werden können, beispielsweise die dargestellte Wellenleiterstruktur 14. Die von der Strahlquelle 9 abgegebene gepulste Laserstrahlung 2 wird dabei nicht-linear im Material 13 absorbiert, was eine dauerhafte Veränderung der Materialeigenschaften im bearbeiteten Raumgebiet bewirkt. Alternativ oder zusätzlich zur Wirkung der Ablenkeinheit 12 und des verstellbaren Objektivs 3 kann natürlich auch das Objekt mit dem transparenten Material 13 selbst gegenüber dem Objektiv 3 bewegt werden. Dies mag insbesondere dann von Interesse sein, wenn Strukturen erzeugt werden sollen, deren Ausdehnung die durch die Ablenkeinheit 12 bzw. den Verstellweg des Objektivs 3 erreichbaren Positionen zumindest teilweise überschreitet.

Durch die inhomogen lineare Polarisierung des fokussierten Laserstrahls 8 erhält man im transparenten Material 13 einen Fokus, der kleinere Abmessungen hat, als er aufgrund des Strahlengangs und insbesondere des Objektivs 3 eigentlich zu erwarten wäre. Die Genauigkeit der Materialbearbeitung ist somit gesteigert. Gleiches gilt für das Instrument 1 der Figur 1.

Die durch den Polarisationsmodulator 10 erreichte Fokusreduzierung kann je nach Strahlengang und insbesondere je nach Art des transparenten Materials 13 unterschiedlich stark ausfallen. Zur Optimierung ist deshalb zweckmäßigerweise vorgesehen, daß die Qualität der Materialbearbeitung, beispielsweise die Größe des Raumgebietes, in dem eine nicht-lineare Wechselwirkung festgestellt wird, gemessen wird und durch Variation der Einstellung des Polarisationsmodulators 10 eine Optimierung vorgenommen wird. Beispielsweise kann die Größe einer im Material 13 oder in der Hornhaut 4 erzeugten Plasmablase gemessen werden und durch Verstellung des von einem (nicht dargestellten) Steuergerät angesteuerten Polarisationsmodulator 10 eine Minimierung durchgeführt werden. Alternativ kann auch mit Hilfe einer geeigneten Ansteuerung des Polarisationsmodulators 10 die von der Laserquelle 9

abgegebene Strahlung schrittweise reduziert werden, bis eine minimale, zur gewünschten nicht-linearen Wechselwirkung noch ausreichende Strahlungsleistung oder Pulsdauer vorliegt.

Die Wirkung des Polarisationsmodulators 10 ist beispielhalber in Figur 5 gezeigt, die einen x-y-Schnitt 15 durch den in z-Richtung (senkrecht zur Zeichenebene) des propagierenden Laserstrahl 2. Wie zu sehen ist, verleiht der Polarisationsmodulator 10 dem Laserstrahl 2 eine inhomogene Polarisationsverteilung in der Form, daß zwei Teilgebiete 16 und 17 vorliegen, in denen die Polarisationsrichtung zwar jeweils identisch aber gegenüber dem anderen Teilgebiet um 180° phasenverschoben ist. Dies ist in Figur 5 durch die parallelen aber in entgegengesetzter Richtung ausgerichteten Pfeile symbolisiert. Anstelle einer zwei Teilgebiete 16 und 17 aufweisenden Inhomogenität kann natürlich auch jede beliebig andere sektorale Polarisationsverteilung verwendet werden.

Figur 6 zeigt eine radiale Polarisationsverteilung im x-y-Schnitt 15. Die Polarisationsrichtungen weisen radial von der optischen Achse A nach außen.

Figur 7 zeigt eine inhomogene Polarisierung mit Phasensprüngen innerhalb ringförmiger Bereiche im x-y-Schnitt 15. Die Phasensprünge treten an um die optische Achse A konzentrisch angeordneten Sprungstellen 18 auf. Der Laserstrahl 2 ist damit im x-y-Schnitt 15 in vier Ringe 19 mit unterschiedlicher Polarisierung geteilt. Zwischen benachbarten Ringen liegt ein Phasensprung der Polarisationsrichtung vor, der aus Anschaulichkeitsgründen als 180° -Phasensprung dargestellt ist. Natürlich ist jeder andere Phasensprung ebenfalls möglich.

Um einen der inhomogen linearen Polarisationszustände der Figuren 5 bis 7 auszubilden, weist der Polarisationsmodulator 10 in einer bevorzugten Ausführungsvariante eine segmentierte Wellenplatte auf, die allein oder in Kombination mit anderen optischen Bauelementen die gewünschte Polarisationsmodulation bewirkt. In einer anderen Ausführungsvariante sind dichroitische Glaspolarisationen vorgesehen, die entsprechend der für die jeweilige Anwendung gewünschten Polarisationsverteilung gestaltet sind. Auch können Flüssigkristall-Bauelemente verwendet werden, die üblicherweise als räumlicher Lichtmodulator (SLM) bezeichnet werden und eine flexible Anpassung der Polarisationsverteilung an eine jeweilige Bearbeitungsaufgabe durch Ansteuerung mit einem entsprechenden Stellsignal ermöglichen.

Figur 8 zeigt eine weitere Baumöglichkeit für einen Polarisationsmodulator 10, wie sie für eine gänzlich andere Anwendung aus der EP 0 764 858 A2, deren Offenbarungsgehalt diesbezüglich vollständig hier eingebunden werden soll, bekannt ist. Es handelt sich dabei um einen Wabenkondensor 20, der eine Vielzahl von wabenförmigen Zellen 21 aufweist. Der Querschnitt des Laserstrahls 2 wird somit in eine Vielzahl von Facetten 21 geteilt. Jede Facette

21 besteht aus einer Halbwellenplatte aus doppelbrechendem Material und ist beispielsweise gemäß dem in Figur 8 gezeigten Muster orientiert. Sie sind jeweils in Richtung der Winkelhalbierenden zwischen der in Figur 8 ebenfalls angezeigten Polarisationsrichtung P der einfallenden linear polarisierten Laserstrahlung 2 und dem jeweiligen zur optischen Achse A gerichteten Radius durch die Mitte jeder Facette 21 ausgerichtet. Damit bewirkt jede Halbwellenplatten-Facette 2 die Drehung der Polarisationsrichtung in Richtung des genannten Radius.

Figur 9 zeigt die Wirkung dieser Anordnung der Hauptachsen 22 der Facetten 21 des Wabenkondensors 20, indem nun die Polarisationsrichtungen 23 nach Durchlaufen radial auf die optische Achse A ausgerichtet sind.

Figur 10 zeigt vereinfacht eine zweite Ausführungsform eines Aufbaus eines Laserbearbeitungsinstruments 1, das im Wesentlichen dem der Figur 4 gleicht. Die unterschiedliche Ausbildung betrifft den der Laserquelle 9 nachgeordneten Modulator, der hier als Intensitätsmodulator 24 ausgebildet ist. Die übrigen Elemente entsprechen den der bereits erläuterten ersten Ausführungsform, weshalb ihre Beschreibung hier nicht wiederholt wird.

Der Intensitätsmodulator 24 verändert das Strahlprofil des Behandlungsstrahls 2 so, daß die Strahlintensität nahe der optischen Achse geschwächt wird. Der Intensitätsmodulator 24 liegt deshalb in der in Figur 10 gezeigten Bauweise in einer zur Fokusebene konjugierten Ebene. Im Intensitätsmodulator 24 wird ein modulierendes Element 25 eingesetzt, für das zwei mögliche Bauweisen in den Figuren 11 und 12 dargestellt sind.

Das Element 25 ist in der Bauweise der Figur 11 aus einem transparenten Substrat 26 gebildet, auf das ein hier kreisförmiges Blendenelement 27 aufgebracht ist. Das Blendenelement 27 hat einen Durchmesser D, der beispielsweise 50% des Strahlquerschnittes des Behandlungsstrahls 2 abdeckt. Anstelle eines abdeckenden Blendenelementes 27 kann auch ein Absorptionselement 27 verwendet werden, das im schraffiert dargestellten Kernbereich den Behandlungslaserstrahl 2 schwächt, aber nicht abschattet.

Das gleiche Ergebnis liefert die in Figur 12 dargestellte Bauweise des Elements 25, allerdings arbeitet diese Variante 27 reflektiv. Dazu ist eine Spiegelschicht 28 vorgesehen, die in einem kreisförmigen Bereich 29 innerhalb des Strahlquerschnittes transparent oder teiltransparent ist.

Die durch den Bereich 29 tretenden Strahlungsanteile werden aus dem Behandlungsstrahl 2 abgetrennt, nur die reflektierten Anteile werden im Fokus gebündelt. Der kreisförmige Bereich

29 kann statt volltransparent auch teilreflektierend ausgebildet werden, was wiederum eine Schwächung im Kernbereich des Behandlungslaserstrahls 2 zur Folge hat.

Ein beispielhaftes Ergebnis für das mit dem Element 25 erhältliche Strahlprofil zeigt Figur 13.

- 5 Das ursprüngliche gauß-förmige Profil 30, das im linken Graph der Figur 13 als Intensität I über den Ort x aufgetragen ist, wird durch Wirkung des Intensitätsmodulators 24 zu einem Profil 31 verformt, das im Zentrum mit einem Durchmesser B deutlich geschwächt ist. Es ist zu beachten, daß die Darstellungen des linken Graphs und des rechten Graphs der Figur 13 nicht die gleiche Skala auf der Intensitätsachse haben; der rechte Graph ist hinsichtlich der Intensität
10 vergrößert dargestellt, um den Effekt zu verdeutlichen.

Im Ergebnis ist der Behandlungsstrahl 2 nach dem Intensitätsmodulator 24 nicht mehr gauß-förmig im Profil, was ebenso wie die bereits zur ersten Ausführungsform geschilderte Polarisationsmodulation gleichermaßen zu einer besseren Fokusbildung führt.

15

- Eine weitere Möglichkeit zur Realisierung des Intensitätsmodulators 24 ist in den Figuren 14-16 dargestellt. Hier ist im Intensitätsmodulator 24 auf einem Substrat 32 eine Powell-Asphäre 33 vorgesehen, die den gauß-förmig profilierten Behandlungsstrahl 2 auf bestimmte Weise auffächert, so daß ein divergierendes Strahlenbündel 34 entsteht. Wie die Darstellung
20 beispielhafter Teilstrahlen in Figur 14 verdeutlicht, bewirkt die Powell-Asphäre 33 eine Energieumverteilung von der optischen Achse weg. Nach einer (in Figur 14 zur Vereinfachung nicht gezeigte) Sammellinse und/oder diffraktivem optischen Element liegt dann der Behandlungsstrahl 2 mit nicht-gauß-förmigem Profil vor. Ein Beispiel für das erreichbare Profil ist in Figur 16 gezeigt. Wie zu sehen ist, ist die Intensität I des modifizierten Behandlungsstrahls
25 2 in einem annähernd rechteckigen Profil 37 über den Strahlquerschnitt verteilt.

- Die Wirkung der Powell-Asphäre 33 ist vor allem dadurch bedingt, daß sie im Querschnitt gesehen kegelförmig ist. Figur 15 zeigt diesen Kegel 35. Die Spitze des Kegels 35 ist mit einem bestimmten Radius 36 abgerundet. Details zur Konstruktion und zur Auslegung der Powell-Asphäre 33 finden sich in der bereits genannten US 4.826.299.
30

- In einer weiterführenden Ausführungsform kann das Instrument 1 sowohl einen Polarisationsmodulator 10 gemäß einer der beschriebenen Bauweisen als auch einen Intensitätsmodulator 24 in einer der beschriebenen Bauweisen verwenden.
35 Zweckmäßigerweise kann der Polarisationsmodulator auch gleichzeitig eine Amplitudenmodulation realisieren. Dazu können z.B. die Ringe 19 der Figur 7 oder die Zellen bzw. Facetten 21 der Figur 8 mit geeigneten strahlungsintensitätsbeeinflussenden Eigenschaften versehen werden, so daß die Strahlungsintensität im Zentrum des Strahls

geschwächt wird. Eine Kombination des Polarisationsmodulators 10 mit dem Intensitätsmodulator 24 in einem Bauteil führt zu einem besonders kompakten Aufbau. Eine Kombination eines separaten Polarisationsmodulators 10 mit einem eigenständigen Intensitätsmodulator 24 ist dagegen vergleichsweise kostengünstig zu realisieren.

Carl Zeiss Meditec AG
Anwaltsakte: PAT 9030/054-PCT

22. März 2005
K/22/vz

Patentansprüche

1. Bearbeitungsvorrichtung, die ein Material (4, 13) durch nicht-lineare Absorption von
5 Bearbeitungs-Laserstrahlung (2) bearbeitet und die aufweist:
 - eine die Laserstrahlung (2) abgebende Laserstrahlquelle (9) und
 - eine Optik (3), die die Laserstrahlung (2) zur nicht-linearen Absorption in oder auf das Material
 (4, 13) fokussiert,**gekennzeichnet durch**
- 10 einen Polarisations-Modulator (10), der bewirkt, daß die fokussierte Laserstrahlung (2) linear
 polarisiert ist, mit über den Strahlquerschnitt (15) variierender Polarisationsrichtung (23).

2. Bearbeitungsvorrichtung, die ein Material (4, 13) durch nicht-lineare Absorption von
 Bearbeitungs-Laserstrahlung (2) bearbeitet und die aufweist:
 - 15 - eine die Laserstrahlung (2) abgebende Laserstrahlquelle (9) und
 - eine Optik (3), die die Laserstrahlung (2) zur nicht-linearen Absorption in oder auf das Material
 (4, 13) fokussiert,**gekennzeichnet durch**
- 20 einen Intensitäts-Modulator (24), der eine Intensitätsverteilung der Laserstrahlung (2)
 modifiziert, wobei er die Strahlungsintensität (I) nahe der optischen Achse schwächt.

3. Bearbeitungsvorrichtung nach Anspruch 1 oder 2, gekennzeichnet durch eine
 Ablenkeinheit (12), die durch steuerbare Ablenkung des Laserstrahls (2) eine räumliche Lage
 des Fokus im Material (4, 13) verändert.
- 25 4. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet,
 daß der Modulator (10, 24) zwischen der Laserstrahlquelle (9) und der Ablenkeinheit (12)
 angeordnet ist.

5. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der obigen Ansprüche in Verbindung mit Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserstrahlquelle (9) linear polarisierte Strahlung (2) abgibt und der Polarisationsmodulator (10) über den Strahlquerschnitt (15) inhomogen die Polarisationsrichtung (23) des Laserstrahls (2) verändert.
- 5
6. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der Ansprüche 1, 2 oder 3, dadurch gekennzeichnet, daß der Modulator (10, 24) in der Laserstrahlquelle (9) angeordnet ist, so daß die Laserstrahlquelle (9) Laserstrahlung (2) mit über dem Strahlquerschnitt (15) variierender Polarisationsrichtung (23) bzw. mit modifizierter Intensitätsverteilung abgibt.
- 10
7. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der obigen Ansprüche in Verbindung mit Anspruch 1, dadurch gekennzeichnet, daß der Polarisationsmodulator (10) hinsichtlich der Variation der Polarisationsrichtung (23) einstellbar, insbesondere steuerbar ist.
- 15
8. Bearbeitungsvorrichtung nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch eine Steuereinrichtung, welche die Variation der Polarisationsrichtung (23) während des Betriebs der Bearbeitungsvorrichtung verändert.
- 20
9. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der obigen Ansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserstrahlquelle (9) gepulste Laserstrahlung (2) mit einer Pulslänge kürzer 10.000 fs, insbesondere kürzer 500 fs, abgibt.
- 25
10. Bearbeitungsvorrichtung nach Anspruch 7, gekennzeichnet durch eine Pulswiederholfrequenz von über 100 kHz, insbesondere von über 450 kHz.
11. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der obigen Ansprüche in Verbindung mit Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Intensitäts-Modulator (24) Strahlungsanteile nahe der optischen Achse ausblendet.
- 30
12. Bearbeitungsvorrichtung nach einem der obigen Ansprüche in Verbindung mit Anspruch 2, dadurch gekennzeichnet, daß der Intensitäts-Modulator (24) eine Energieumverteilung weg von Bereichen nahe der optischen Achse vornimmt.
- 35
13. Verfahren zur Materialbearbeitung, bei dem Laserstrahlung (2) in das oder auf das Material (4, 13) fokussiert wird, wobei die Parameter der Laserstrahlung (2) und der Fokussierung so gewählt werden, daß am Material (4, 13) eine nicht-lineare Absorption der Laserstrahlung (2) bewirkt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Laserstrahlung (2) vor der

Fokussierung linear polarisiert wird, mit über den Strahlquerschnitt (15) variierender Polarisationsrichtung (23).

- 5 14. Verfahren zur Materialbearbeitung, bei dem Laserstrahlung (2) in das oder auf das Material (4, 13) fokussiert wird, wobei die Parameter der Laserstrahlung (2) und der Fokussierung so gewählt werden, daß am Material (4, 13) eine nicht-lineare Absorption der Laserstrahlung (2) bewirkt wird, **dadurch gekennzeichnet**, daß die Intensitätsverteilung der Laserstrahlung (2) vor der Fokussierung modifiziert wird, wobei die Strahlungsintensität (I) nahe der optischen Achse geschwächt wird.
- 10 15. Verfahren nach Anspruch 10 oder 11, dadurch gekennzeichnet, daß die Lage des Fokus der Laserstrahlung (2) mindestens zweidimensional verstellt wird.
- 15 16. Verfahren nach einem der obigen Verfahrensansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Variation der Polarisationsrichtungen bzw. die Modifikation der Intensitätsverteilung während der Materialbearbeitung verstellt wird.
- 20 17. Verfahren nach Anspruch 16, dadurch gekennzeichnet, daß ein Güteparameter der Materialbearbeitung ermittelt und geregelt wird, wobei die Variation der Polarisationsrichtungen (23) als Stellgröße verwendet wird.
- 25 18. Verfahren nach einem der obigen Verfahrensansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß die Laserstrahlung (2) in die Nähe der Oberfläche des zu bearbeitenden Materials (4, 13) fokussiert wird, wobei insbesondere der Abstand des Fokus zur Oberfläche des zu bearbeitenden Materials (4, 13) etwa im Bereich der Rayleigh-Länge der Laserstrahlung (2) liegt.
- 30 19. Verfahren nach einem der obigen Verfahrensansprüche, dadurch gekennzeichnet, daß im Material durch flächenhaftes Aneinanderreihen von durch nicht-lineare Absorption erzeugten optischen Durchbrüchen (11) Schnittflächen ausgebildet werden, die im Material (4) liegen und insbesondere eine zur Oberfläche des Materials (4) verlaufende Schnittlinie haben.

1/6

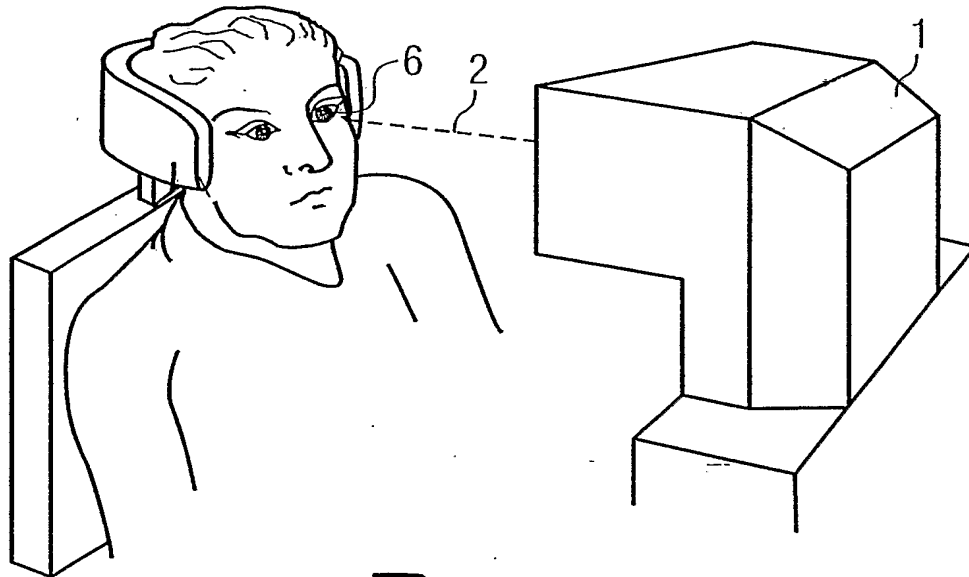


Fig. 1

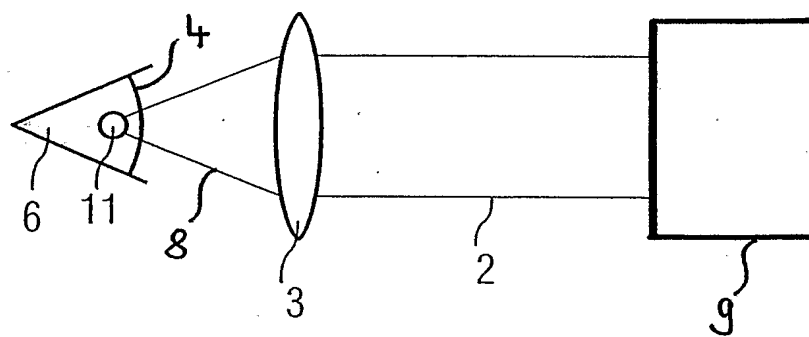
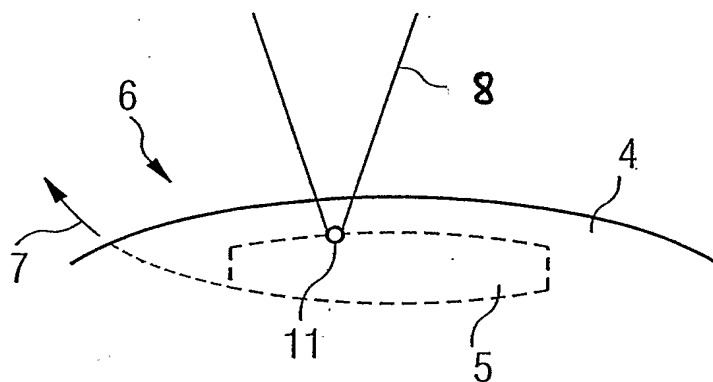
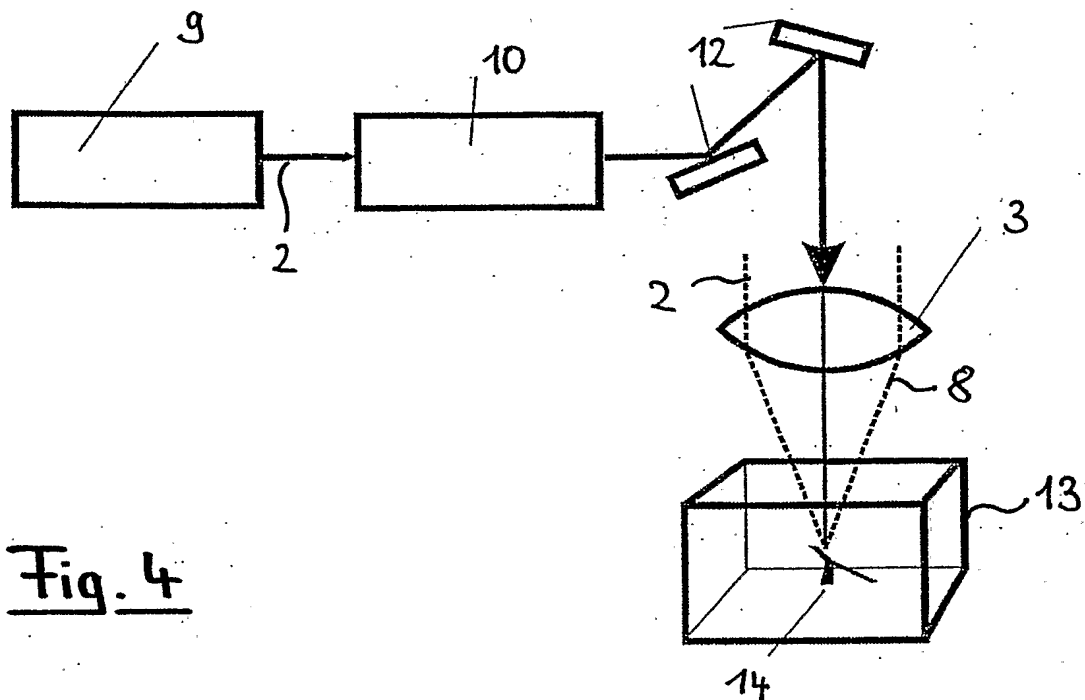


Fig. 2

2/6

Fig. 3Fig. 4

3/6

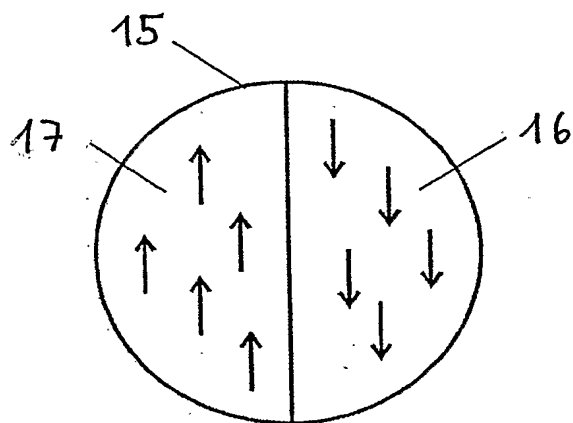


Fig. 5

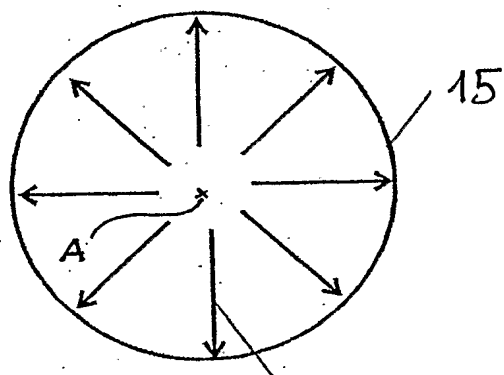


Fig. 6

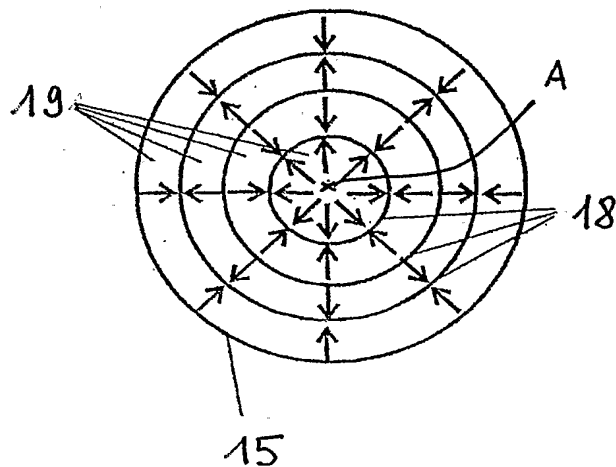
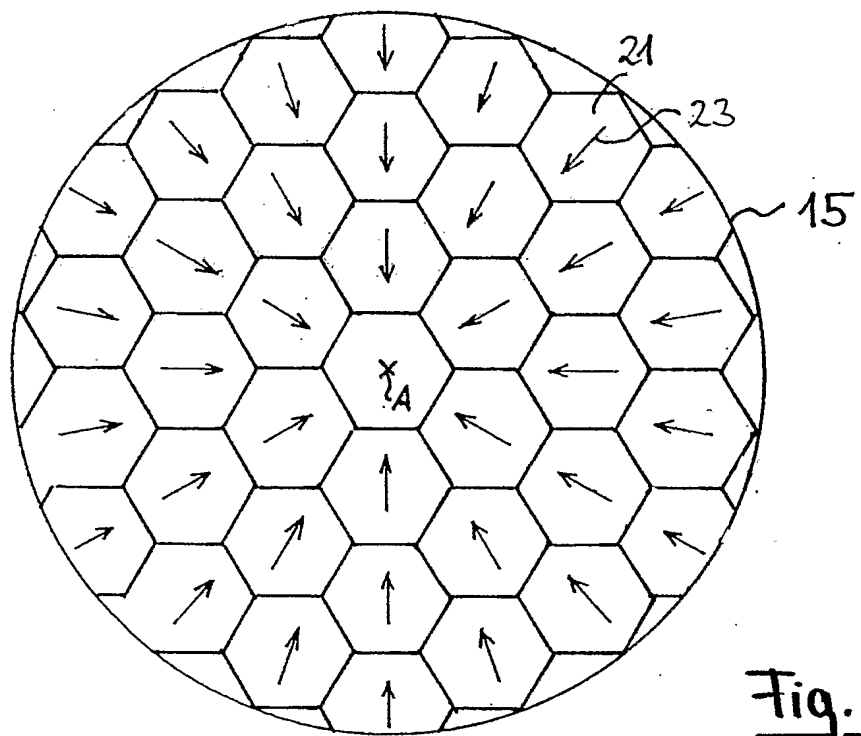
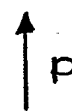
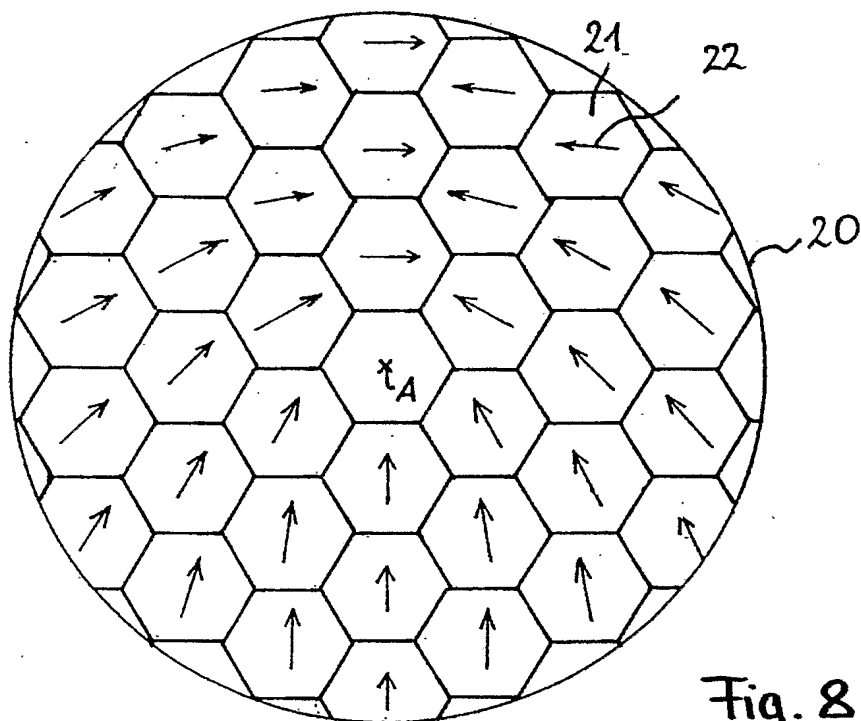


Fig. 7

4/6



5/6

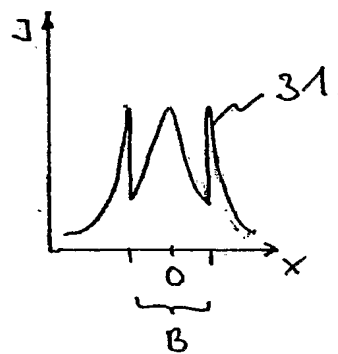
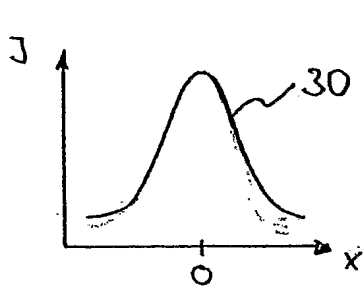
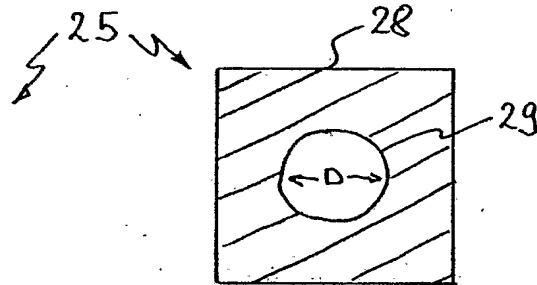
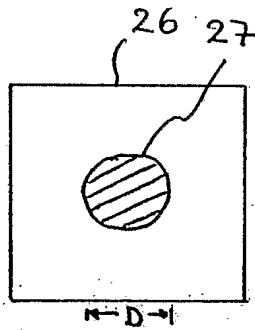
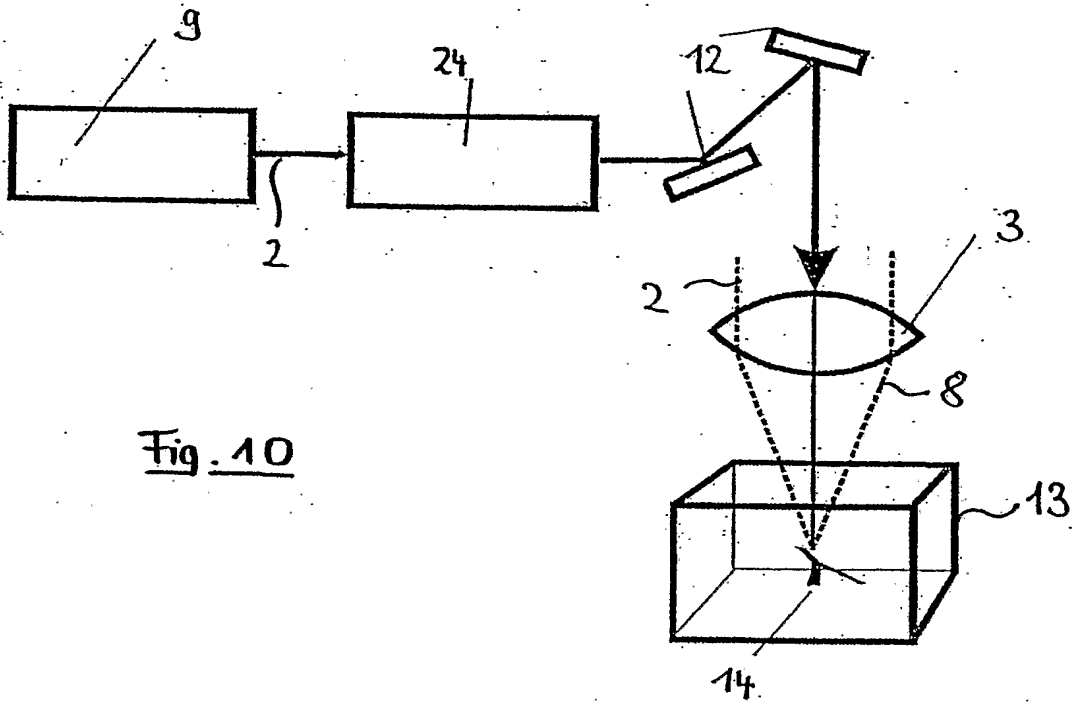


Fig. 13

6/6

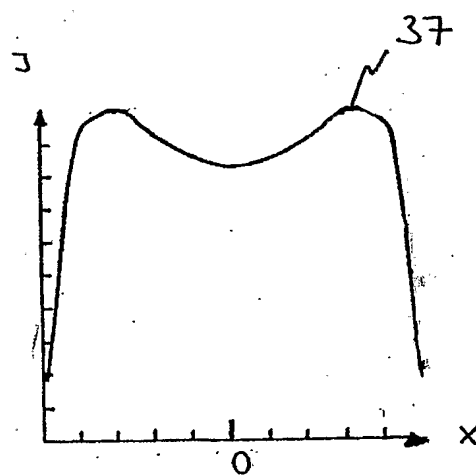
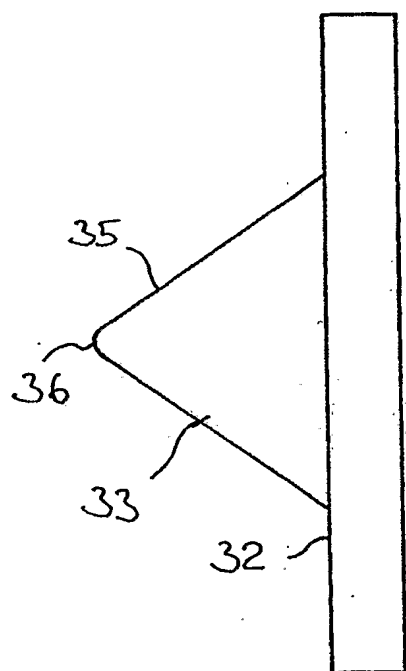
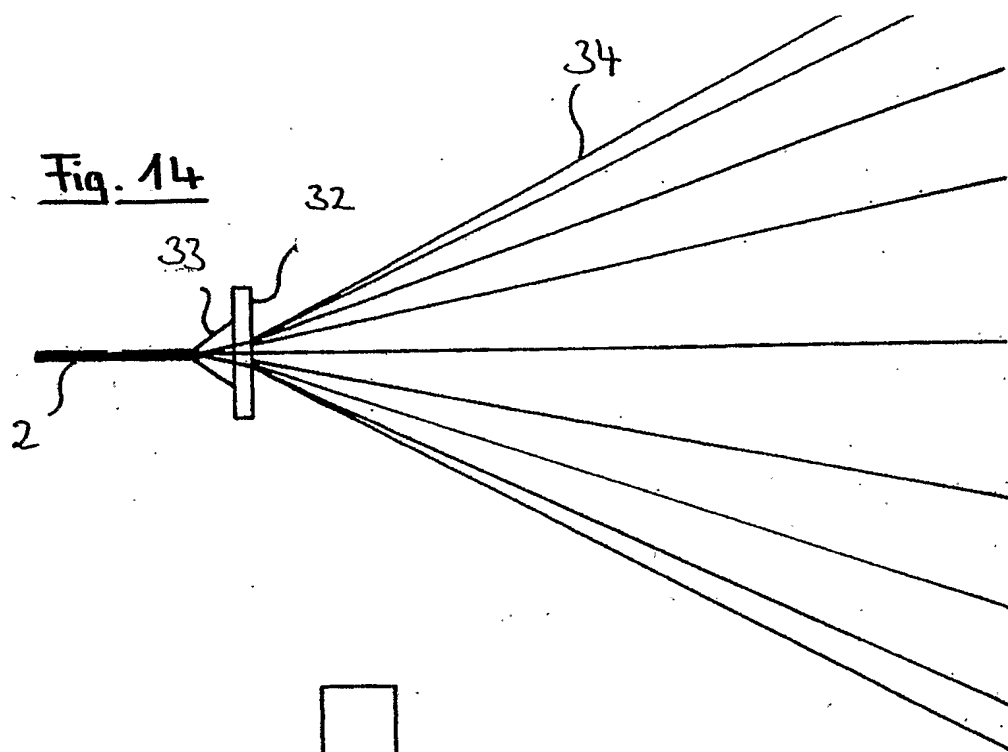


Fig. 16

Fig. 15

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No
PCT/EP2005/003066

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

IPC 7 A61F9/007 B23K26/00 B23K26/06

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)
IPC 7 A61F B23K

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practical, search terms used)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
A	WO 03/028940 A (NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY) 10 April 2003 (2003-04-10) paragraphs '0011!, '0016!, '0039!, '0045! - '0047!, '0064! - '0066!; claims 8-11; figures 1,10-12	1-12
A	EP 0 764 858 A (CARL ZEISS; CARL ZEISS-STIFTUNG HANDELND ALS CARL ZEISS; CARL ZEISS SM) 26 March 1997 (1997-03-26) cited in the application column 4, line 34 - column 7, line 4	1,5-7
A	US 6 268 586 B1 (STUART BRENT C ET AL) 31 July 2001 (2001-07-31) column 2, line 55 - column 5, line 36; claims 1,20; figures 5,6	1
	----- -/--	

☒ Further documents are listed in the continuation of box C.

☒ Patent family members are listed in annex.

* Special categories of cited documents :

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance
 "E" earlier document but published on or after the international filing date
 "L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)
 "O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means
 "P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
 "X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
 "Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
 "&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

7 June 2005

Date of mailing of the international search report

15/06/2005

Name and mailing address of the ISA

European Patent Office, P.B. 5818 Patentlaan 2
 NL - 2280 HV Rijswijk
 Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
 Fax: (+31-70) 340-3016

Authorized officer

Rick, K

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International Application No

PCT/EP2005/003066

C.(Continuation) DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category *	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X	US 5 470 329 A (SUMIYA ET AL) 28 November 1995 (1995-11-28) column 4, line 21 - column 6, line 7 column 7, line 4 - line 19; figures 5-9,18 -----	2-4,6, 11,12
X	EP 0 257 836 A (L'ESPERANCE, FRANCIS A; VISX INCORPORATED) 2 March 1988 (1988-03-02) column 8, line 19 - line 36 column 12, line 21 - column 13, line 18 column 23, line 40 - line 53; figures 1,8-11 -----	2,3,6,9, 11
X	WO 93/25166 A (SUMMIT TECHNOLOGY, INC) 23 December 1993 (1993-12-23)	2,6,11
Y	page 12, line 16 - page 16, line 32 page 18, line 29 - line 33 page 20, line 21 - page 24, line 10; figures 3-7 -----	12
X	US 5 219 343 A (L'ESPERANCE, JR. ET AL) 15 June 1993 (1993-06-15)	2,6,11
Y	column 6, line 31 - column 7, line 4; figures 10,11 -----	12
Y	US 4 826 299 A (POWELL ET AL) 2 May 1989 (1989-05-02) cited in the application the whole document -----	12

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.
PCT/EP2005/003066

Box I Observations where certain claims were found unsearchable (Continuation of item 1 of first sheet)

This international search report has not been established in respect of certain claims under Article 17(2)(a) for the following reasons:

1. ☒ Claims Nos.: 13-19
because they relate to subject matter not required to be searched by this Authority, namely:

PCT Rule 39.1(iv) – method for treatment of the human or animal body by surgery.
2. ☐ Claims Nos.:
because they relate to parts of the international application that do not comply with the prescribed requirements to such an extent that no meaningful international search can be carried out, specifically:
3. ☐ Claims Nos.:
because they are dependent claims and are not drafted in accordance with the second and third sentences of Rule 6.4(a).

Box II Observations where unity of invention is lacking (Continuation of item 2 of first sheet)

This International Searching Authority found multiple inventions in this international application, as follows:

1. ☐ As all required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers all searchable claims.
2. ☐ As all searchable claims could be searched without effort justifying an additional fee, this Authority did not invite payment of any additional fee.
3. ☐ As only some of the required additional search fees were timely paid by the applicant, this international search report covers only those claims for which fees were paid, specifically claims Nos.:
4. ☐ No required additional search fees were timely paid by the applicant. Consequently, this international search report is restricted to the invention first mentioned in the claims; it is covered by claims Nos.:

Remark on Protest

- ☐ The additional search fees were accompanied by the applicant's protest.
☐ No protest accompanied the payment of additional search fees.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2005/003066

Patent document cited in search report		Publication date	Patent family member(s)	Publication date
WO 03028940	A	10-04-2003	US 2002023903 A1 WO 03028940 A1	28-02-2002 10-04-2003
EP 0764858	A	26-03-1997	DE 19535392 A1 DE 59610745 D1 EP 1343051 A1 EP 0764858 A2 JP 9184918 A US 2002126380 A1 US 6191880 B1 US 2001012154 A1	27-03-1997 06-11-2003 10-09-2003 26-03-1997 15-07-1997 12-09-2002 20-02-2001 09-08-2001
US 6268586	B1	31-07-2001	AU 3873699 A WO 9955487 A1	16-11-1999 04-11-1999
US 5470329	A	28-11-1995	JP 2907656 B2 JP 6078947 A US RE38590 E1 US 5620437 A	21-06-1999 22-03-1994 14-09-2004 15-04-1997
EP 0257836	A	02-03-1988	US 4732148 A CA 1300689 C DE 3782887 D1 DE 3782887 T2 EP 0257836 A1 IL 83185 A JP 1685545 C JP 3044533 B JP 63073955 A KR 9311034 B1 US 4773414 A US 5507741 A US 5807379 A ZA 8705690 A	22-03-1988 12-05-1992 14-01-1993 17-06-1993 02-03-1988 31-01-1993 11-08-1992 08-07-1991 04-04-1988 20-11-1993 27-09-1988 16-04-1996 15-09-1998 11-02-1988
WO 9325166	A	23-12-1993	AU 4633793 A WO 9325166 A1	04-01-1994 23-12-1993
US 5219343	A	15-06-1993	US 5312320 A CA 1243732 A1 DE 3481164 D1 EP 0151869 A2 JP 1685517 C JP 3043904 B JP 60119935 A US 4770172 A US 4773414 A US 5507741 A US 5807379 A US 5188631 A US 5207668 A US 4665913 A US 4732148 A US 4729372 A US 4718418 A ZA 8407841 A CA 1278046 C DE 3687155 D1	17-05-1994 25-10-1988 08-03-1990 21-08-1985 11-08-1992 04-07-1991 27-06-1985 13-09-1988 27-09-1988 16-04-1996 15-09-1998 23-02-1993 04-05-1993 19-05-1987 22-03-1988 08-03-1988 12-01-1988 29-05-1985 18-12-1990 07-01-1993

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

Information on patent family members

International Application No

PCT/EP2005/003066

Patent document cited in search report	Publication date	Patent family member(s)	Publication date
US 5219343	A	DE 3687155 T2	17-06-1993
		EP 0218427 A2	15-04-1987
		ES 2002375 A6	01-08-1988
		IL 80124 A	21-06-1992
		JP 1685541 C	11-08-1992
		JP 3033015 B	15-05-1991
		JP 62101247 A	11-05-1987
		KR 9300083 B1	08-01-1993
		ZA 8607364 A	27-05-1987
US 4826299	A	02-05-1989 CA	1276827 C
			27-11-1990

INTERNATIONALER RECHERCHENBERICHT

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2005/003066

A. KLASSTIFIZIERUNG DES ANMELDUNGSGEGENSTANDES

IPK 7 A61F9/007 B23K26/00 B23K26/06

Nach der Internationalen Patentklassifikation (IPK) oder nach der nationalen Klassifikation und der IPK

B. RECHERCHIERTE GEBIETE

Recherchierter Mindestprüfstoff (Klassifikationssystem und Klassifikationssymbole)

IPK 7 A61F B23K

Recherchierte aber nicht zum Mindestprüfstoff gehörende Veröffentlichungen, soweit diese unter die recherchierten Gebiete fallen

Während der internationalen Recherche konsultierte elektronische Datenbank (Name der Datenbank und evtl. verwendete Suchbegriffe)

EPO-Internal, WPI Data, PAJ

C. ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN

Kategorie*	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
A	WO 03/028940 A (NANYANG TECHNOLOGICAL UNIVERSITY) 10. April 2003 (2003-04-10) Absätze '0011!, '0016!, '0039!, '0045! - '0047!, '0064! - '0066!; Ansprüche 8-11; Abbildungen 1,10-12 -----	1-12
A	EP 0 764 858 A (CARL ZEISS; CARL ZEISS-STIFTUNG HANDELND ALS CARL ZEISS; CARL ZEISS SM) 26. März 1997 (1997-03-26) in der Anmeldung erwähnt Spalte 4, Zeile 34 - Spalte 7, Zeile 4 -----	1,5-7
A	US 6 268 586 B1 (STUART BRENT C ET AL) 31. Juli 2001 (2001-07-31) Spalte 2, Zeile 55 - Spalte 5, Zeile 36; Ansprüche 1,20; Abbildungen 5,6 ----- -/--	1



Weitere Veröffentlichungen sind der Fortsetzung von Feld C zu entnehmen



Siehe Anhang Patentfamilie

* Besondere Kategorien von angegebenen Veröffentlichungen :

"A" Veröffentlichung, die den allgemeinen Stand der Technik definiert, aber nicht als besonders bedeutsam anzusehen ist

"E" älteres Dokument, das jedoch erst am oder nach dem internationalen Anmeldedatum veröffentlicht worden ist

"L" Veröffentlichung, die geeignet ist, einen Prioritätsanspruch zweifelhaft erscheinen zu lassen, oder durch die das Veröffentlichungsdatum einer anderen im Recherchenbericht genannten Veröffentlichung belegt werden soll oder die aus einem anderen besonderen Grund angegeben ist (wie ausgeführt)

"O" Veröffentlichung, die sich auf eine mündliche Offenbarung, eine Benutzung, eine Ausstellung oder andere Maßnahmen bezieht

"P" Veröffentlichung, die vor dem internationalen Anmeldedatum, aber nach dem beanspruchten Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist

"T" Spätere Veröffentlichung, die nach dem internationalen Anmeldedatum oder dem Prioritätsdatum veröffentlicht worden ist und mit der Anmeldung nicht kollidiert, sondern nur zum Verständnis des der Erfindung zugrundeliegenden Prinzips oder der ihr zugrundeliegenden Theorie angegeben ist

"X" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann allein aufgrund dieser Veröffentlichung nicht als neu oder auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden

"Y" Veröffentlichung von besonderer Bedeutung; die beanspruchte Erfindung kann nicht als auf erfinderischer Tätigkeit beruhend betrachtet werden, wenn die Veröffentlichung mit einer oder mehreren anderen Veröffentlichungen dieser Kategorie in Verbindung gebracht wird und diese Verbindung für einen Fachmann naheliegend ist

"&" Veröffentlichung, die Mitglied derselben Patentfamilie ist

Datum des Abschlusses der internationalen Recherche

7. Juni 2005

Absendedatum des internationalen Recherchenberichts

15/06/2005

Name und Postanschrift der Internationalen Recherchenbehörde
Europäisches Patentamt, P.B. 5818 Patentlaan 2
NL - 2280 HV Rijswijk
Tel. (+31-70) 340-2040, Tx. 31 651 epo nl,
Fax: (+31-70) 340-3016

Bevollmächtigter Bediensteter

Rick, K

C.(Fortsetzung) ALS WESENTLICH ANGESEHENE UNTERLAGEN		
Kategorie ^o	Bezeichnung der Veröffentlichung, soweit erforderlich unter Angabe der in Betracht kommenden Teile	Betr. Anspruch Nr.
X	US 5 470 329 A (SUMIYA ET AL) 28. November 1995 (1995-11-28) Spalte 4, Zeile 21 – Spalte 6, Zeile 7 Spalte 7, Zeile 4 – Zeile 19; Abbildungen 5-9,18 -----	2-4,6, 11,12
X	EP 0 257 836 A (L'ESPERANCE, FRANCIS A; VISX INCORPORATED) 2. März 1988 (1988-03-02) Spalte 8, Zeile 19 – Zeile 36 Spalte 12, Zeile 21 – Spalte 13, Zeile 18 Spalte 23, Zeile 40 – Zeile 53; Abbildungen 1,8-11 -----	2,3,6,9, 11
X	WO 93/25166 A (SUMMIT TECHNOLOGY, INC) 23. Dezember 1993 (1993-12-23)	2,6,11
Y	Seite 12, Zeile 16 – Seite 16, Zeile 32 Seite 18, Zeile 29 – Zeile 33 Seite 20, Zeile 21 – Seite 24, Zeile 10; Abbildungen 3-7 -----	12
X	US 5 219 343 A (L'ESPERANCE, JR. ET AL) 15. Juni 1993 (1993-06-15)	2,6,11
Y	Spalte 6, Zeile 31 – Spalte 7, Zeile 4; Abbildungen 10,11 -----	12
Y	US 4 826 299 A (POWELL ET AL) 2. Mai 1989 (1989-05-02) in der Anmeldung erwähnt das ganze Dokument -----	12

Feld II Bemerkungen zu den Ansprüchen, die sich als nicht recherchierbar erwiesen haben (Fortsetzung von Punkt 2 auf Blatt 1)

Gemäß Artikel 17(2)a) wurde aus folgenden Gründen für bestimmte Ansprüche kein Recherchenbericht erstellt:

1. ☒ Ansprüche Nr. **13-19**
weil sie sich auf Gegenstände beziehen, zu deren Recherche die Behörde nicht verpflichtet ist, nämlich
Regel 39.1(iv) PCT – Verfahren zur chirurgischen Behandlung des menschlichen oder tierischen Körpers
2. ☐ Ansprüche Nr.
weil sie sich auf Teile der internationalen Anmeldung beziehen, die den vorgeschriebenen Anforderungen so wenig entsprechen, daß eine sinnvolle internationale Recherche nicht durchgeführt werden kann, nämlich
3. ☐ Ansprüche Nr.
weil es sich dabei um abhängige Ansprüche handelt, die nicht entsprechend Satz 2 und 3 der Regel 6.4 a) abgefaßt sind.

Feld III Bemerkungen bei mangelnder Einheitlichkeit der Erfindung (Fortsetzung von Punkt 3 auf Blatt 1)

Die internationale Recherchenbehörde hat festgestellt, daß diese internationale Anmeldung mehrere Erfindungen enthält:

1. ☐ Da der Anmelder alle erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren rechtzeitig entrichtet hat, erstreckt sich dieser internationale Recherchenbericht auf alle recherchierbaren Ansprüche.
2. ☐ Da für alle recherchierbaren Ansprüche die Recherche ohne einen Arbeitsaufwand durchgeführt werden konnte, der eine zusätzliche Recherchegebühr gerechtfertigt hätte, hat die Behörde nicht zur Zahlung einer solchen Gebühr aufgefordert.
3. ☐ Da der Anmelder nur einige der erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren rechtzeitig entrichtet hat, erstreckt sich dieser internationale Recherchenbericht nur auf die Ansprüche, für die Gebühren entrichtet worden sind, nämlich auf die Ansprüche Nr.
4. ☐ Der Anmelder hat die erforderlichen zusätzlichen Recherchegebühren nicht rechtzeitig entrichtet. Der internationale Recherchenbericht beschränkt sich daher auf die in den Ansprüchen zuerst erwähnte Erfindung; diese ist in folgenden Ansprüchen erfaßt:

Bemerkungen hinsichtlich eines Widerspruchs

- ☐ Die zusätzlichen Gebühren wurden vom Anmelder unter Widerspruch gezahlt.
- ☐ Die Zahlung zusätzlicher Recherchegebühren erfolgte ohne Widerspruch.

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

PCT/EP2005/003066

Formblatt PCT/ISA/210 (Anhang Patentfamilie) (Januar 2004)

INTERNATIONALE RECHERCHENBERICHT

Angaben zu Veröffentlichungen, die zur selben Patentfamilie gehören

Internationales Aktenzeichen

PCT/EP2005/003066

Im Recherchenbericht angeführtes Patentdokument	Datum der Veröffentlichung	Mitglied(er) der Patentfamilie	Datum der Veröffentlichung	
US 5219343	A	DE 3687155 T2	17-06-1993	
		EP 0218427 A2	15-04-1987	
		ES 2002375 A6	01-08-1988	
		IL 80124 A	21-06-1992	
		JP 1685541 C	11-08-1992	
		JP 3033015 B	15-05-1991	
		JP 62101247 A	11-05-1987	
		KR 9300083 B1	08-01-1993	
		ZA 8607364 A	27-05-1987	
US 4826299	A	02-05-1989	CA 1276827 C	27-11-1990